

FRP ブッシュを適用した推進浮上案内兼用コイルの 応力評価

松江 仁* 饗庭 雅之* 鈴木 正夫*

Stress Evaluation on the PLG Ground Coil with FRP Fastening Devices

Hitoshi MATSUE Masayuki AIBA Masao SUZUKI

Ground coils provided along the entire length of the guideway are essential for outdoor use over a long time in the superconducting magnetically levitated transportation system. Therefore, high reliability is inevitable for ground coils. We are under developing the new fastening devices made of GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics) to prevent from reduction of the axial tension of fastening bolts and stress concentration around the fastening devices. We describe about the stress measurement results for the PLG ground coil with the FRP fastening devices.

キーワード：浮上式鉄道，地上コイル，FRP，応力，モールド樹脂，耐久性

1. はじめに

超電導磁気浮上式鉄道用の地上コイルは全線にわたって敷設され、その数は莫大なものとなるだけでなく、長期間にわたり屋外で使用される。そのため、地上コイルには高い信頼性や耐久性が求められる^{1) 2)}。

本報告では、地上コイルをガイドウェイへ取り付けるための締結部の信頼性向上を目的として開発を進めているFRP製の締結部（以下、FRPブッシュ）を紹介するとともに、FRPブッシュを適用した推進浮上案内兼用コイル（combined Propulsion, Levitation and Guidance coil, 以下PLGコイル）³⁾を試作し、その試作したPLGコイルを供試体として、実使用を想定した定置試験で応力測定を行ったので、その結果を報告する。

8の字コイル)が配置される。さらに、8の字コイルは、ガイドウェイ上の車両を挟んだ向かい側の8の字コイルとケーブルによって接続されており、案内力を得る。すなわち、車両が左右方向に変位した時に、車両が近づいた側のコイルに反発力が、車両から遠ざかった側のコイルには吸引力が働くような電流が誘導されるような回路としている。また、ガイドウェイに沿った前後方向（車両の進行方向と平行な方向）の8の字コイルには三相の駆動電源を接続している。浮上及び案内の原理は従来の浮上案内兼用方式と同様であり、推進の原理は従来のリニア同期モータと同様である。

供試体としたPLGコイルの外形を図2に、主な仕様を表1に示す。

2. PLG コイルの概要

超電導磁気浮上式鉄道用地上コイルの主な機能は、車上の超電導磁石との間に働く電磁力により、推進力、浮上力、案内力の3つの力を発生することにある。PLGコイルは、この3つの機能を1つのコイルで兼用させることにより所要コイル数を削減し、地上コイルの建設コスト低減を狙いとしたものである。PLG方式の基本的なコイル構成を図1に示す。車両側面には超電導コイルが、ガイドウェイ側壁には互いに巻き方向が異なる上側コイルと下側コイルを組み合わせた8の字形状のコイル（以下、

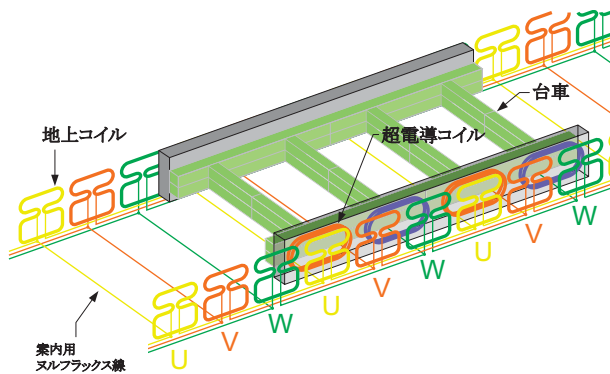


図1 PLG方式のコイル構成

* 浮上式鉄道技術研究部（電磁路技術）

特集：浮上式鉄道技術とその応用

3. 地上コイル締結部の信頼性改善⁴⁾

3.1 地上コイルの締結方法

地上コイルをガイドウェイに取り付ける方法としては、①コイルに締結穴を設け直接ボルトで締結する方法、②FRPなどの締結部材を介してコイルを間接的に取り付ける方法、③FRP部材を介してコイルを鉄筋に締結しコンクリートで埋め込む方法、などが検討されてきた。これらの開発経緯から、コイルの着脱が容易であり構成が簡単なボルト締結方式を前提としてPLGコイルの開発を進めている。

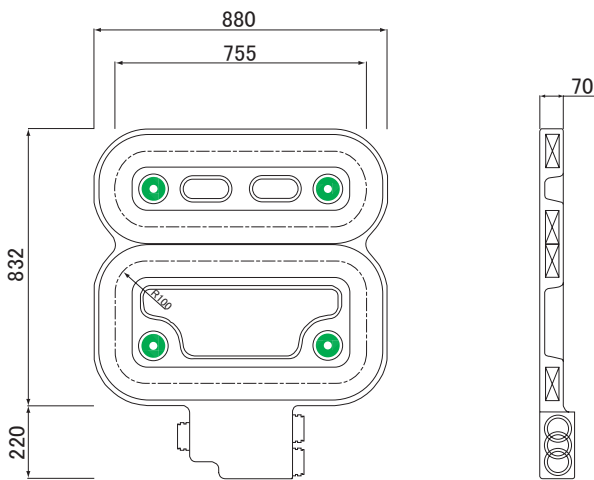


図2 PLGコイルの外形

表1 PLGコイルの主な仕様

単位コイル	形状	矩形
	コイル中心間寸法	上：755mm × 230mm 下：755mm × 370mm
導体断面寸法	約100mm × 40mm	
導体材質	電気用アルミニウム (JIS H 2110 相当)	
コイル本体	外形寸法	880mm × 1052mm
	上下コイル中心間隔	402mm
	絶縁種別	Y種以上
	成形方法	エポキシ樹脂注型
	対地絶縁寸法	12mm (標準値)
	口出し端子数	3 (相間用2, 案内用1)
	コイル固定方法	ボルト締結+上下支持
	締結部構成	FRPブッシュ4箇所
表面保護層	FRP板を含み5mm	

3.2 ボルト締結方式の課題

地上コイルは導体巻線を樹脂で成型することにより製作される。地上コイルの樹脂部に締結ボルトによる圧縮力を与えると、樹脂の圧縮クリープにより締結ボルトの軸力が変化する。また、樹脂と締結ボルトの線膨張係数の違いによっても締結ボルトの軸力が変化する。軸力抜けによる締結ボルトの緩みは、日常の保守点検のコスト

を増加させるだけでなく、締結構成そのものの信頼性も損ねることになりかねない。そこで、当初の試作PLGコイルでは、圧縮クリープを事実上無視できる金属ブッシュをボルト締結部に埋め込む構成としていた。図3に金属ブッシュの外観を示す。金属ブッシュとモールド樹脂との界面に発生する応力集中を緩和するために、金属ブッシュとモールド樹脂との界面を接着しないようにしていたが、これが原因で繰り返しの電磁力によりその界面が摩耗する問題が新たに発生することがわかった。

3.3 開発したFRPブッシュの概要

上記のような背景から、金属ブッシュの代わりとなるFRPブッシュの適用を検討した。これは、あらかじめ樹脂が含浸され半硬化状態になったプリプレグシートを金型心棒に巻きつけた後に加熱成形することにより製作した厚肉FRPパイプを適用したものである。締結部に適用するために、締結部の寸法にあわせて適当な長さに裁断し、外周を機械加工している。図4にFRPブッシュの外観を示す。FRPブッシュの特徴は、ガラス繊維の配向や含有率により強度や弾性率を調整できることを利用して、以下の機能を持たせている点にある。

- (1) 圧縮クリープを金属と同程度に低減することを目的とした内周側のガラス繊維の軸方向配置 (軸方向弾性率強化)
- (2) ブッシュとモールド樹脂との界面に発生する応力の緩和を目的とした外周側の低弾性率化

さらに、金属ブッシュと比較して付加的に得られるFRPブッシュの長所としては、以下の点があげられる。

- (1) 車上の超電導磁石の移動磁場による渦電流損失がFRPブッシュでは発生しない
- (2) 機械加工が容易である
- (3) モールド樹脂との接着性がよい
- (4) 軽量である
- (5) コスト低減が可能である



図3 金属ブッシュの外観

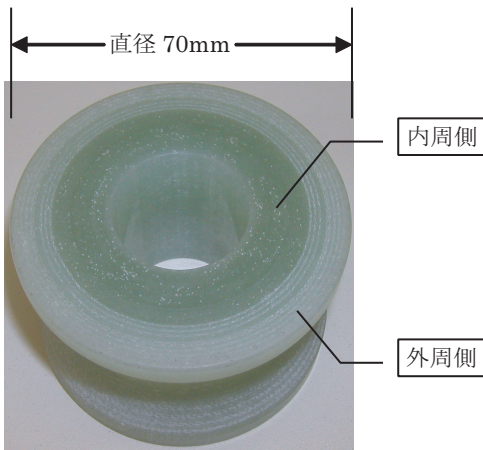


図4 FRP ブッシュの外観（内周と外周でガラス繊維の配向が異なるため、異なった色に見える）

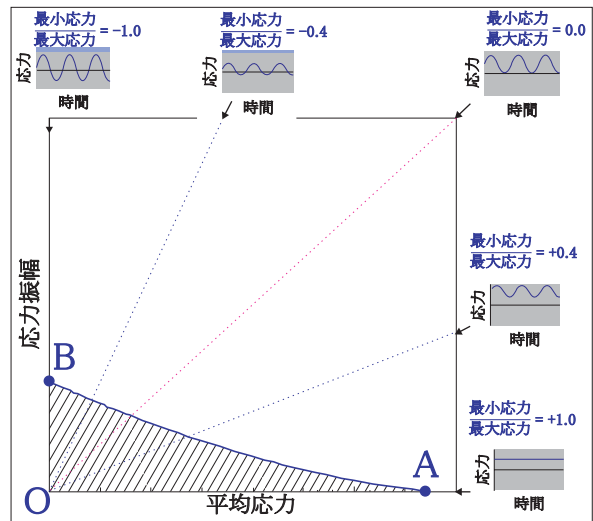


図5 疲労限度線の考え方
(図中の波形は変動応力のイメージ)

4. 地上コイルの機械強度評価手法

4.1 地上コイルの劣化要因

屋外使用が前提となる地上コイルは電気機器であり、構造部材を兼ねたモールド樹脂は電気的機能に加え、機械的耐久性が要求される。また、高分子材料であるモールド樹脂は長期に亘る屋外環境で様々な材料劣化を生じる。注意すべき劣化要因としては、吸水、紫外線、熱などが挙げられる。従って、地上コイルの強度評価には、これらの劣化因子による強度低下を十分に考慮しておく必要がある。

4.2 地上コイルの応力発生要因

表2に示すように地上コイルには様々な応力が発生する。地上コイルのモールド樹脂はこれらのすべてが足しあわされた応力により疲労する。また、電磁力のような短時間で変動する応力と残留応力のような長時間にわたり一定となる応力に分類できる。

4.3 疲労限度線図によるモールド樹脂の耐久性評価

平均応力の影響を考慮した疲労限度を推定する場合に疲労限度線図が用いられる。図5は疲労限度線図の考え方の説明図である。横軸に平均応力、縦軸に応力振幅をとることにより、平均応力の存在下での変動応力の疲労限界を表現できるようにしている。図中のA点は静的応力による破断応力であり、B点は両振り振幅の応力での疲れ強さ（平均応力が存在しない応力での疲労強度）である。AOBで囲まれた斜線領域に地上コイルの応力状態がある場合に応力が安全な範囲にあると考える。図中の3本の点線は応力比（=最小応力/最大応力）がそれぞれ

表2 応力の発生要因

要因	力の内容	今回測定	
電磁力	浮上力	誘導電流により超電導磁石との間に発生する力	○
	案内力	同上	○
	推進力	外部電源より供給する電流と超電導磁石との間に発生する力	○
	異常時	車両異常時に発生する電磁力	
熱	導体温度	通電発熱に伴う導体温度上昇による内部力	○
	環境温度	環境温度の変化によりコイル全体の温度が変化することによる内部力	
	異常時	瞬時的過電流による温度勾配を原因とする熱応力	
締結	面精度	コイル取り付け面やコイル平面度の凹凸にあわせてコイルを変形させる力	○
	締結軸力	締結ボルト軸力の負荷による圧縮力	○
風圧	高速走行する車両から受ける空力的圧力		
残留応力	コイルのモールド成形に伴い発生する内部力		
異物衝突	外来飛来物の衝突時などにコイルに与えられる力		

れ -0.4, 0.0, +0.4 であるグラフ上の点を意味しており、端にはその応力変動のイメージを示している。なお、図5では、平均応力の圧縮側の領域は省略している。

特集：浮上式鉄道技術とその応用

5. 要因別応力測定

PLGコイルに働く応力のうち、電磁力により発生する応力（以下、電磁応力）、導体温度上昇により発生する応力（以下、熱応力）、締結により発生する応力（以下、締結応力）を、それぞれ、実使用時と等価な定置試験にて測定した。なお、ここでは、常温におけるモールド樹脂の曲げ弾性率をひずみ測定値に乗じた値を応力測定値とした。測定箇所を図6に示す。測定結果を図7及び図8に示す。

5.1 電磁応力

表3のような上側の単位コイルを引き剥がす方向の電磁力が最大となる走行条件と等価な電磁力をPLGコイルに与えて、PLGコイルの応力を測定した。具体的には、地上コイル電磁加振装置⁵⁾を用いて、PLGコイルを超電導磁石の前に設置した状態でPLGコイルに直流電流を通電した時にPLGコイルに発生する応力を測定した。測定状況を図9に示す。定置試験での電磁力は図10に示すようにほぼ実走行と同等になるようにしている。ただし、大きな電流をPLGコイルに通電すると熱応力も同時に発生してしまうため、実際には図10に示した電磁力の10分の1の電磁力を与えて測定された応力の10倍を電磁力による応力とした。

表3 上側の単位コイルの引き剥がし力が最大となる走行条件

項目	条件
上下変位	均衡変位よりさらに10mm下がった変位
左右変位	20mm（引き剥がし力を重視しているため、超電導磁石から遠くなる方の地上コイルと電磁力を等価にする）
推進電流	推進電流最大で、かつ、超電導磁石の位置に対して-40度の位相ずれ
走行速度	500km/h
台車負担荷重	230kN/台車

5.2 熱応力

図11のように模擬側壁にPLGコイルを規定軸力で締結した状態で直流電流を通電し、その時の応力を測定した。PLGコイルは仕様上、外気温度よりも30℃だけ高い温度まで導体の温度上昇を許容することとしているため、導体温度を抵抗法により推定し、上側の単位コイルの導体温度上昇が30℃で飽和するように通電電流を調整した。

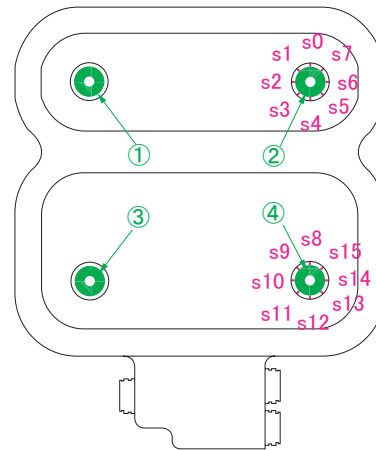


図6 応力測定箇所（車両と対向する面）
（丸数字はFRPブッシュの番号）

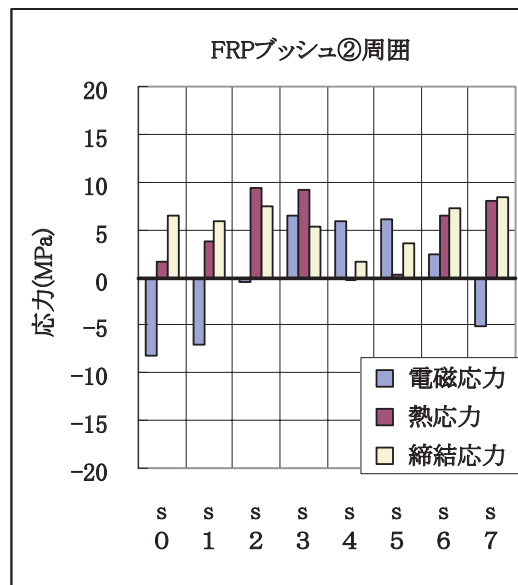


図7 要因別応力測定結果（上側のFRPブッシュ周囲）

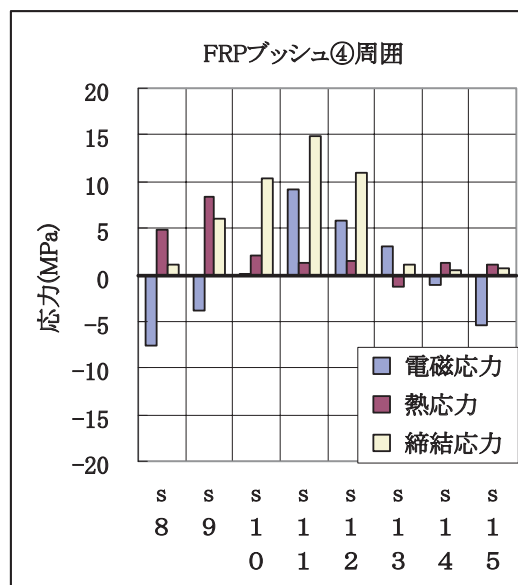


図8 要因別応力測定結果（下側のFRPブッシュ周囲）

5.3 締結応力

PLGコイルと模擬側壁との間にステンレス製のスペーサを挿入し、コイル取り付け面に意図的に段差を設定した状態でPLGコイルを規定軸力で締結した。

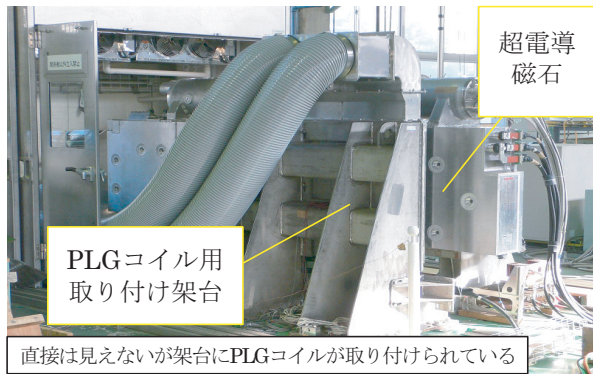


図9 電磁応力測定状況

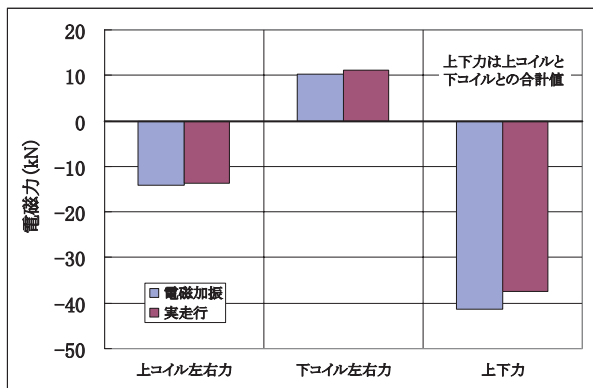


図10 実走行時と定置試験での電磁力計算値比較

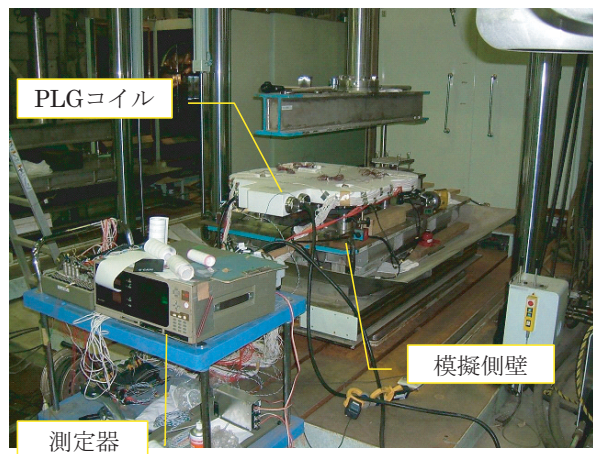


図11 熱応力測定状況

6. 疲労限度線図を用いた強度評価

6.1 平均応力と応力振幅

疲労限度線図により寿命を評価するために、PLGコイルに発生する応力を平均応力と応力振幅に分ける必要がある。電磁応力は片振りの振動であり、電磁応力の半分が応力振幅となり、残りの半分が平均応力となると考えた。熱応力は繰り返し数が電磁応力より充分少ないため、静的な応力とみなした。残留応力はすべての測定箇所での静的な応力であるとした。風圧による応力はここでは無視した。以上の考え方に基づいて、平均応力と応力振幅をそれぞれ(1)式及び(2)式により計算した。

$$\sigma_{ave} = \frac{1}{2}\sigma_e + \sigma_t + \sigma_f + \sigma_r \quad (1)$$

$$\sigma_{amp} = \frac{1}{2}|\sigma_e| \quad (2)$$

σ_{ave} ：平均応力， σ_{amp} ：応力振幅， σ_e ：電磁応力， σ_t ：熱応力， σ_f ：締結応力， σ_r ：残留応力

6.2 疲労特性

PLGコイルのモールド樹脂の繰り返し回数 10^8 回における疲労限度線図（破壊確率50%）を図12に示す。なお、モールド樹脂の疲労限度線には、下記のような仮定が含まれている。

- (1) 変動応力に対する限界強度は 10^7 回までの疲労試験結果から外挿した推定値を適用した。
- (2) 静的な曲げ強度試験の結果から紫外線による劣化係数を0.9，吸水による劣化係数を0.9とし、定常応力に対する劣化係数と変動応力に対する劣化係数は同じであるとした。ここでは、表面塗装の効果は無視している。
- (3) 推進コイル用モールド樹脂の疲労限度線図の結果から、PLGコイル用モールド樹脂の疲労限度線図も下に凸の形状となるものとした²⁾。

この結果からPLGコイルの代表点に発生する応力は、環境劣化による強度低下を考慮したモールド樹脂の疲労限度線図（破壊確率50%）よりも下回っていた。

以上の結果を踏まえ、地上コイル電磁加振試験装置を使用した疲労試験による耐久性の確認を行う予定である。

特集：浮上式鉄道技術とその応用

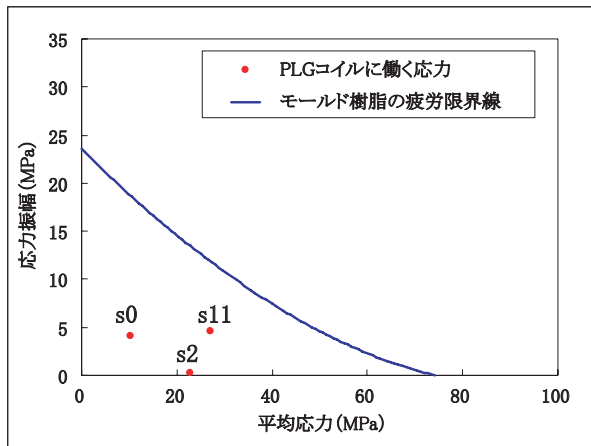


図 12 モールド樹脂の推定疲労限度線図

7. まとめ

超電導磁気浮上式鉄道用PLGコイルのボルト締結部の信頼性向上策として開発を進めているFRPブッシュをPLGコイルに適用し、電磁力により発生する応力、導体温度上昇により発生する応力、締結により発生する応力を定置試験で測定した。

また、モールド樹脂の耐久性を評価した結果、PLGコ

イルに発生する応力は、疲労限度線図を下回る結果となった。

以上の結果から、引き続き地上コイル電磁加振試験装置を用いた耐久性確認試験を行う予定である。

本試験は国庫補助金を受けて実施した。

文献

- 1) 饗庭雅之, 鈴木正夫: 推進・浮上・案内兼用地上コイルの耐久性検証, 鉄道総研報告, Vol.19, No.6, pp.19-24, 2005
- 2) 鈴木裕之, 鈴木正夫, 相原直樹: 地上コイル用モールド樹脂の耐久性評価試験, 鉄道総研報告, Vol.21, No.9, pp.17-22, 2007
- 3) 村井敏昭: 推進・浮上・案内を兼用するリニア同期モータの特性, 電気学会論文誌, Vol.114-D, No.7/8, pp.746~747, 1994.7/8
- 4) 鈴木正夫他: 地上コイル耐振性締結部の開発, 第13回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集, pp.265-266, 2006
- 5) 田中実, 饗庭雅之, 鈴木正夫: 地上コイル耐久性評価用電磁加振試験装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.20, No.8, pp.17-22, 2006